

学校编码: 10384

分类号_____密级_____

学号: 23120081153191

UDC _____

厦门大学

硕 士 学 位 论 文

电磁参数可控的
舰用雷达吸波涂层研究

Study of Radar Absorbing Coatings for Ships
with Controlled Electromagnetic Parameters

黄 李 琳

指导教师姓名: 周建华 副教授

专 业 名 称: 电磁场与微波技术

论文提交日期: 2011 年 月

论文答辩时间: 2011 年 月

学位授予日期:

答辩委员会主席: _____

评 阅 人: _____

2011 年 月

厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下,独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果,均在文中以适当方式明确标明,并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范(试行)》。

另外,该学位论文为()课题(组)的研究成果,获得()课题(组)经费或实验室的资助,在()实验室完成。(请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称,未有此项声明内容的,可以不作特别声明。)

声明人(签名):

年 月 日

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

（ ） 1. 经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，
于 年 月 日解密，解密后适用上述授权。

（ ） 2. 不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：

年 月 日

厦门大学博硕士论文摘要库

摘 要

随着现代科学技术的迅猛发展,世界各国对船舰表面涂覆材料的研究开发越加重视,作为核心技术之一的吸波涂层设计显得尤为重要。基于聚合物吸波材料,本论文对应用于船舰表面的雷达吸波涂层进行了探索,主要研究工作包括聚苯胺的掺杂改性、雷达吸波涂层的制备、导电吸波涂层的电磁性能及其可控性探索。论文内容主要由如下四个部分组成。

第一部分包括本研究课题的背景与全文概述。首先介绍了船舰隐身技术和船舰雷达波隐身技术,列举了舰用雷达吸波材料的几种主要类型及国内外研究成果,针对性地介绍了论文所做的主要工作和相关创新点。

第二部分是关于两方面基础理论:一是雷达吸波材料的吸波机理和电磁参数可控性所基于的原理,具体对材料的电磁损耗和电磁参数及其与导电性之间的关系作了详细的分析和推导;二是吸波涂层组分选定所基于的理论根据,具体针对广泛应用于船舰表面的雷达吸波涂层,讨论了聚合物掺杂导电材料的设计方案。

第三部分的主要工作是聚合物吸波涂层的设计与制备,以及涂层相关性能的测试与分析。针对船舰表面的涂覆需求,聚合物吸波涂层的制备工艺一种是采用了适于平板类基底材料制膜的匀速浸渍提拉法;为方便涂层基本电磁性能的测试与加压电控实验,另一种则采用了无基底材料的模具法制膜工艺。基于具有较好雷达吸波特性的聚苯胺材料,利用这两种方法所制备的薄膜均达到聚苯胺分散性良好,薄膜表面均匀、平整无气泡等要求。采用不同种类的环氧树脂来辅助聚苯胺成膜,选择最佳原料配比制备出表面形貌光滑均匀、在可见光波段吸收性能较好的吸波涂层。

第四部分主要针对改性聚苯胺吸波涂层的导电性和电控性进行了深入研究。利用功能磺酸对聚苯胺进行掺杂改性实验制备导电薄膜,并对导电涂层的吸波性能及其电磁可控性进行了实测和分析,验证涂层的电压控制吸波效果。对比三种不同功能磺酸掺杂与不同反应时间的条件下改性聚苯胺薄膜的导电性能,结果表明在最佳制备条件下,涂层的电导率已处于半导体并接近导体的导电水平。所制备的导电聚苯胺薄膜在可见光波段的吸波性能有所提高,但在雷达波段的吸波性

能随着导电性的升高而降低。在外加不同电压的作用下，采用甲基磺酸掺杂改性聚苯胺所研制的一种舰用雷达吸波涂层存在着一定的电磁参数可控性。

关键词 雷达吸波材料；聚苯胺导电薄膜；掺杂改性；电磁参数可控性

厦门大学博硕士论文摘要库

ABSTRACT

With the rapid development of modern science and technology, more and more attention was paid to the study of novel coatings applicable to ship all over the world. As the point technology, the design of wave absorbing materials is especially important. Based on a polymer absorbing material, the paper work includes the doping modification of polyaniline material, the preparation of radar absorbing coating; and the research on the controlled electromagnetic properties of conductive absorbing coating. This paper consists of four parts as follows.

Part I is about the background of this project and major coverage of this paper. First, introduced stealthy technique for ships and radar stealthy technique for ships, list several kinds of radar absorbing materials for ships and the actuality and achievement at home and abroad, put emphasis on the main ground work and innovation points of this paper.

In part III, two major foundations are presented. One is the theory basis for absorbing mechanism and controlled electromagnetic parameters of radar absorbing materials, also the relationship between relative permittivity, permeability and electric conductivity derived and analyzed in detail; the another is about the rationale for the constituent determination of absorbing coating.

Part III is about the design and preparation technology of polymer absorbing coating, and the measurement and analysis for the relative performances of absorbing coating. Aimed at the needs for ship coating, the constant impregnating pulling method was used for film preparation based on plat materials. For the purpose of performance testing, a prototype tool was used for film preparation without substrate. With polyaniline material of good radar absorption, the films prepared by these two methods declare better quality, meeting the basic requirements of uniform film surface without air bubble. Utilizing different epoxide resins to assist the film formation of polyaniline, the most suitable ratio of raw materials was chosen to have prepared

radar absorbing coating with smooth surface morphology and good absorbing property in visible light.

Part IV is aimed at the deep analysis for the electric conductivity and controlled EM parameters of modified polyaniline absorbing coating. Inspect and verified the control effect of voltage on the films. Contrasting the electric conductivity of modified polyaniline films with three kinds of sulfoacid, the results show that in the best preparation condition, the electrical conductivity of the absorption coating reached the level of semiconductor, and close to that of conductor. The absorbing property of the prepared polyaniline conductive films has been improved in visible light, but turned a little bad in microwave band. With different voltages applied, the controlled electromagnetic property of a radar absorbing coating for ships, prepared by methanesulfonate modified polyaniline, has been verified.

Keywords: Radar absorbing material, polyaniline conductive film, doping modification, controlled Electro-magnetic parameters

目 录

第一章 绪论.....	1
1.1 课题研究背景.....	1
1.1.1 舰艇隐身技术.....	1
1.1.2 舰艇雷达波隐身技术.....	2
1.1.3 舰用雷达吸波材料.....	4
1.2 舰用雷达吸波材料的发展现状.....	6
1.2.1 舰用雷达吸波材料的种类.....	6
1.2.2 舰用雷达吸波材料的发展现状.....	9
1.3 论文主要研究工作以及内容安排.....	10
1.4 论文创新点.....	12
参考文献.....	13
第二章 基于电磁可控的雷达吸波涂层设计与理论分析.....	16
2.1 吸波原理.....	16
2.1.1 复介电常数与复磁导率对介质吸波性能的影响.....	16
2.1.2 复介电函数与电导率的关系.....	20
2.2 电磁参数可控的雷达吸波涂层基体材料的选定.....	21
2.2.1 有机高聚物导电性及其吸波特性.....	21
2.2.2 聚苯胺的性能及应用.....	22
2.2.3 对聚苯胺的改性掺杂及其掺杂态导电机理.....	23
2.3 导电聚苯胺的成膜可行性研究.....	26
2.3.1 导电聚苯胺的成膜特性.....	26
2.3.2 辅助导电聚苯胺成膜的工艺探索.....	26
2.4 本章小结.....	28
参考文献.....	28
第三章 舰用聚合物吸波涂层的制备与性能研究.....	30
3.1 舰用聚合物吸波涂层的实验室制备工艺.....	30
3.1.1 试剂与仪器.....	30
3.1.2 采用匀速浸渍提拉法的制膜工艺.....	31
3.1.3 吸波涂层不同组分比例条件下的成膜效果表征.....	33
3.1.4 两种不同制膜工艺的优越性对比.....	35
3.2 具有电控加压可行性的舰用吸波涂层的实验室制备工艺.....	38
3.3 不同环氧树脂对聚苯胺成膜的辅助作用.....	40
3.3.1 不同型号环氧树脂的特性参数.....	40
3.3.2 不同型号环氧树脂在可见光波段对涂层吸波性能的影响.....	41
3.3.3 不同制膜工艺对环氧树脂的选择.....	42
3.4 聚合物吸波涂层在可见光波段的吸波性能.....	43
3.5 本章小结.....	45
参考文献.....	45
第四章 导电雷达吸波涂层的制备及其性能研究.....	46

4.1 导电聚苯胺薄膜的制备	46
4.1.1 试剂与仪器	46
4.1.2 舰用雷达吸波涂层基体材料导电聚苯胺的制备	47
4.1.3 不同磺酸掺杂对改性聚苯胺导电性的影响	49
4.1.4 反应时间	52
4.2 舰用吸波涂层在可见光波段的吸波性能	55
4.3 舰用吸波涂层在雷达波 X 波段的吸波性能	56
4.4 舰用雷达吸波涂层的电磁参数可控性分析	57
4.4.1. 电压控制对舰用雷达吸波涂层在雷达波 X 波段吸波性能的影响	57
4.4.2. 舰用雷达吸波涂层的反复加压电控稳定性	61
4.4.3. 涂层导电性与其在雷达波 X 波段电磁参数可控性之间的关系	63
4.4.4. 舰用吸波涂层在雷达波段的吸波性能及其电磁参数可控性	66
4.5 小结	67
参考文献	68
第五章 总结与展望	69
5.1 总结	69
5.2 展望	71
附录一 实验仪器与测试系统	73
附录二 雷达吸波涂层样品	75
附录三 攻读学位期间的研究成果	76
致 谢	77

CONTENTS

Chapter 1 Introduction	1
1.1 Background and Sgnificance of the Subject.....	1
1.1.1 Stealthy Technique for Ships	1
1.1.2 Radar Stealthy Technique for Ships.....	2
1.1.3 Radar Absorbing Materials for Ships.....	4
1.2 The Actuality and Achievement at Home and Abroad	6
1.2.1 Category of Radar Absorbing Materials for Ships.....	6
1.2.2 The Actuality and Achievement of Radar Absorbing Materials for Ships	9
1.3 Main Works and Content Arrangements	10
1.4 Innovative Points	12
References 1	13
Chapter 2 Design and Basic Theories of the Radar Absorbing Coating based on Electro-magnetic Signature-driving	16
2.1 Wave-absorbing Mechanism	16
2.1.1 Complex Dielectric Constant and Complex Permeability	16
2.1.2 Complex Dielectric and Conductivity	20
2.2 Basis Material of the Radar Absorbing Coating based on Eleco-magnetic Signature-driving	21
2.2.1 Electric Conductivity and Absorbing Property of Organic Polymer ...	21
2.2.2 Property and Applications of Polyaniline	22
2.2.3 Doping Vario-property on Polyaniline and Conductive Mechanism ...	23
2.3 Feasibility Study on the Film Forming of Conductive Polyaniline.....	26
2.3.1 Film Forming Characteristic of Conductive Polyaniline	26
2.3.2 Technical Process for the Film Forming of Conductive Polyaniline ...	26
2.4 Summary	28
References 2	28
Chapter 3 Study on Preparation and Properties of the Organic Polymer Absorbing Coating for Ships.....	30
3.1 Preparation Technology of the Polymer Absorbing Coating for Ships	30
3.1.1 Reagents and Instruments	30
3.1.2 Dipping Pulling Method Inuniform Speed	31
3.1.3 Proportion of Ingredients of the Absorbing Coating.....	33
3.1.4 Contrast on Two Kinds of Film-making Processes.....	35
3.2 Preparation Technology of Absorbing Coating for Ships Based on the Feasibility of Electronic Control.....	38
3.3 Access Effect of Different Epoxide Resin on the Film Forming of Doped-PANI.....	40
3.3.1 Characteristic Parameters of Different Epoxide Resin	40
3.3.2 Absorbing Property of Different Epoxide in Visible Bands of Light ..	41

3.3.3 Effect of Different Epoxide Resin for Different Film-making Pprocess .	42
3.4 Absorbing Property of the Organic Polymer Absorbing Coating in Visible Bands of Light.....	43
3.5 Summary	45
References 3.....	45
Chapter 4 Preparation and Performance Study of the Electric Radar Absorbing Coating	46
4.1 Preparation of Conductive Polyaniline Coating.....	46
4.1.1 Reagents and Instruments	46
4.1.2 Preparation of Conductive Polyaniline	47
4.1.3 Effect of Different Sulfoacid for Polyaniline Doping.....	49
4.1.4 Reaction Time	52
4.2 Absorbing Property of the Absorbing Coating in Visible Bands of Light	55
4.3 Absorbing Property of the Absorbing Coating in X-band.....	56
4.4 Analysis of Electro-magnetic Signature-driving Based on the Absorbing Coating for Ships	57
4.4.1. Effect of Voltage Control on the Absorbing Property of the Radar Absorbing Coating in X-band.....	57
4.4.2. Stability of the Effect of Voltage Control Repeatedly on the Radar Absorbing Coating for Ships	61
4.4.3. Relationship of the Electroconductibility and the Property of Electro-magnetic Signature-driving of the Coating in X-band.....	63
4.4.4. Absorbing Property and Electro-magnetic Signature-driving of the Absorbing Coating for Ships in Radar Band	66
4.5 Summary	67
References 4.....	68
Chapter 5 Conclusion and Expectation	69
5.1 Conclusion.....	69
5.2 Expectation.....	71
Appendices.....	73
Acknowledgements	77

第一章 绪论

1.1 课题研究背景

1.1.1 舰艇隐身技术

在现代军事应用上,隐身技术已是不可或缺的元素。1991 年的海湾战争中,美军出动的 30 架 F-117A 战斗机,在被攻击目标几乎没有察觉的情况下,不负众望地投下了数枚激光制导炸弹,为整个战争的胜利做出了巨大贡献。据统计,在海湾战争的首次空袭中,只占多国部队出动飞机总数的 2% 的 F-117A 战斗机,完成了空袭总任务的 40%,成功的原因就在于有效地利用了该机的先进隐身技术,F-117A 曾被称为“黑色喷气机”,原因是机体表面几乎全部涂覆了黑色的雷达吸波材料^[1],它的威力标示着军用隐身技术进入了新一轮的发展高峰。隐身技术俗称隐形技术,亦称“低可探测技术”,是对传统的军事伪装技术的延伸和发展,主要通过研究利用各种不同的技术手段,例如外形设计、吸波材料等,来改变己方目标的可探测信息特征,最大程度地降低被对方探测系统发现的概率,使己方目标、武器装备不被敌方的探测系统探测到。它的出现,使传统的军事伪装技术由防御型向进攻型发展,由消极被动向积极主动发展,在增强己方生存能力的同时,增强对敌方的威胁力。隐身兵器主要包括:隐身飞机、隐身导弹、隐身舰艇、隐身坦克以及其它隐身装备(包含各种技术装备与人员自身)^[2]。

当今世界科学技术迅猛发展,空中预警机、侦察卫星等先进的探测器不断问世,各国不再有绝对的制空权。同样的,在现代的海上军事活动中,红外、声纳、雷达等各种物理场探测器得到了越来越广泛的应用,特别是以这些探测器为基础设备的精确制导武器,由于它们的远距离射程,高命中率及强大的威力,使得舰艇面临严重威胁。经过 100 多年的发展,舰艇隐身技术的研究已经从理论阶段逐渐走向了实用阶段。从技术上讲,舰艇隐身的目的与其它隐身兵器一样,都是为减少和控制舰艇被敌方探测的目标特征,从而降低被敌方探测到的距离和命中概率。这种目标特征主要包括电磁、红外、声学三个方面^[3],相应的,探测舰艇的信号特征,主要采用雷达、红外和声纳等来搜索、发现和确定目标。为此,舰艇

可采取相应的措施来减少或降低这三个方面的可探测信号特征：一、雷达波隐身技术；二、红外隐身技术；三、声隐身技术。对于航行在海面上的大型船舰来说，还有其它几个方面的隐身技术：一、水雾隐身技术；二、微波传播指示技术；三、烟幕伪装^[4]。



图 1-1 各种隐身装备

图注:以上分别为 (a) 隐身船舰；(b) 隐身飞机；(c) 隐形导弹；(d) 隐身坦克。

1.1.2 舰船雷达波隐身技术

舰船雷达波隐身技术是针对舰船雷达探测进行的研究。雷达探测的主要机理是：由雷达的发射天线向指定方向发射出的电磁波如果遇到目标（舰船）将发生反射或散射电磁波，由雷达接收天线捕捉到此类电磁波，即可发现目标（舰船）。当入射电磁波照射到被探测目标时，该目标如果没有采取相应的隐身技术，其表面将朝各个方向反射或散射能量，这些有可能危及目标安全的杂散能量的空间分布会随着被探测目标的形状、大小和结构以及入射波的特性和频率而改变^[5]。通常可用一个有效面积与入射功率密度的乘积来表示雷达目标反射或散射的能量，这个有效面积称为目标的雷达散射截面（ RCS ）。 RCS 是一个变量，主要与目标的大小、形状、结构、本征电磁特性以及入射波的特性和频率有关，反映了目标

的雷达隐身性能。雷达波隐身技术就是为了减小雷达能接收到的目标船舰的反射或散射电磁波，减小船舰的雷达散射截面积（ RCS ）。船舰雷达波隐身主要采用降低被雷达波探测到的距离的方式来减小被对方雷达命中的概率^[5]，影响雷达波探测距离的主要因素可以由公式（1-1）来说明。

雷达的测距方程如式（1-1）所示^[5]。

$$R_t = \left(\frac{P_t \tau G_t G_r F_t^2 F_r^2 \lambda^2 \sigma}{64 \pi^3 T_s S_o C_B L} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (1-1)$$

式中， R_t 指的是雷达探测距离； P_t 指的是雷达峰值发射功率； τ 指的是雷达脉冲宽度； $G_{t,r}$ 指的是发射和接收天线的功率增益； $F_{t,r}$ 指的是天线方向图传输系数； T_s 指的是系统的有效输入噪声系数； S_o 指的是平均的单脉冲信号与噪声功率之比； C_B 指的是相对于匹配滤波器的接收机匹配损耗； L 指的是探测系统的功率损耗因子； σ 指的是目标的平均雷达散射截面积（ RCS ）。

由式(1-1)可知，在不考虑雷达本身的特性参数的情况下，雷达的探测距离与目标船舰的 RCS 的 $\frac{1}{4}$ 次方成正比，只要降低目标船舰的 RCS ，就能减小雷达的探测距离，从而实现目标船舰对雷达的隐身。由此可以推出：当目标船舰的 RCS 由原来的 σ_0 下降为 σ 时，探测距离 R 与原探测距离 R_0 的关系如式（1-2）所示。

$$R = R_0 \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (1-2)$$

可以看出，若目标 RCS 降低 12 dB 或近似 95% 时，探测距离将减小一半。然而在实际的应用中，雷达多在杂波背景下探测目标，此时，雷达的探测距离由式（1-3）给出^[5]。

$$R = \frac{\sigma}{\gamma_0 \theta R_t S_o} \quad (1-3)$$

式(1-3)中， σ 指的是目标的 RCS ， γ_0 指的是后向散射系数； θ 指的是方位面波束宽度； τ 指的是雷达的脉冲宽度。

由式（1-3）可知，在杂波背景下，被探测目标的 σ 减少将引起雷达探测性能的大幅度下降，目标 RCS 降低一半，相应的雷达测距也将下降一半。因此，

提高船舰的隐身性能,减小雷达的探测距离的有效方式之一就是减小目标船舰的 RCS , 有四种主要方法: 一、外形设计; 二、有源对消; 三、无源对消; 四、采用雷达吸波材料。外形设计是指对目标船舰的表面及边缘进行修整和设计, 使目标船舰反射或散射的电磁波能量方向偏离雷达接收天线, 从而减小目标的雷达散射截面。有源对消技术是指由目标船舰主动发送特定的辐射, 其相位和幅度刚好与目标船舰反射的能量相互抵消。无源对消又称阻抗加载, 指在目标船舰的回波源之外引入另一个回波源, 以抵消目标回波源。雷达吸波材料技术是指使用有效的材料使其能吸收或损耗入射到船舰表面的雷达波, 从而令目标船舰回波强度显著衰减的技术, 亦是本文讨论的重点^[6]。

1.1.3 舰用雷达吸波材料

舰用雷达吸波材料是指涂覆在船舰表面的雷达吸波材料吸收入射到材料表面的电磁波, 通过介质损耗和阻抗匹配等各种方式, 将电磁波的能量转化成热能或其它形式的能量而耗散掉的一类材料, 其吸波效率与材料的电磁特性密切相关。良好的舰用吸波材料必须具备两个条件, 一、入射到雷达吸波材料中雷达波的电磁损耗要尽可能大; 二、吸波材料的阻抗与入射雷达波的阻抗达到良好匹配, 满足无反射的要求^[7]。在实际应用中, 要求雷达吸波材料在一定的频宽范围内(2 ~ 18 GHz)对电磁波强烈地吸收, 理想情况下将达到全吸收, 即零反射系数。下面以多层吸波材料为例子, 说明舰用雷达吸波材料的工作机理。

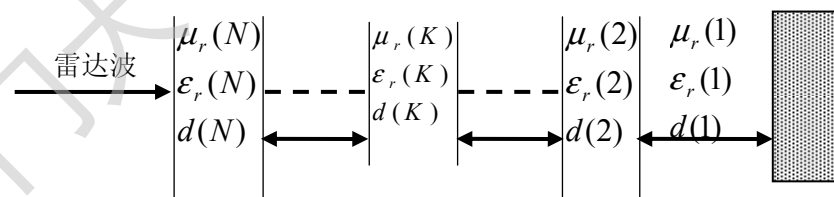


图 1-2 雷达吸波材料结构示意图

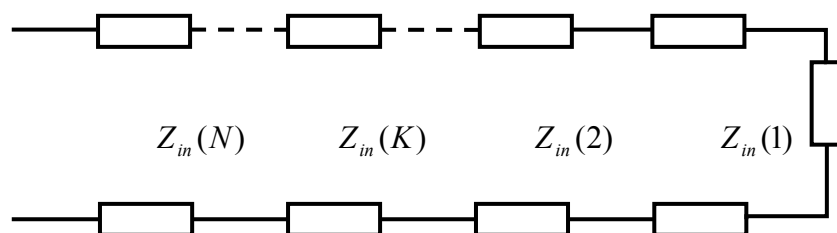


图 1-3 吸波材料结构的等效电路

Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库